

**MAPEO DE UNIDADES LITOGEOFÍSICAS SOBRE DATOS DE GAMMA  
ESPECTROMETRÍA UTILIZANDO CLASIFICACIÓN SUPERVISADA: CASO  
DE ESTUDIO, NORTE DE IRLANDA**



**NORMA MARCELA LARA MARTÍNEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
**ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA**

Director:

**INGRID TATIANA FERREIRA BORDA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA  
BOGOTÁ, DICIEMBRE DE 2017**

# MAPEO DE UNIDADES LITOGEOFÍSICAS SOBRE DATOS DE GAMMA ESPECTROMETRÍA UTILIZANDO CLASIFICACIÓN SUPERVISADA: CASO DE ESTUDIO, NORTE DE IRLANDA

## LITOGEOPHYSICAL MAPPING ON GAMMA SPECTROMETRY DATA USING SUPERVISED CLASSIFICATION: CASE OF STUDY NORTHERN IRELAND

Norma Marcela Lara Martínez  
Ingeniera Catastral y Geodesta  
Estudiante Especialización en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada  
Bogotá DC, Colombia  
u3101392@unimilitar.edu.co

### RESUMEN

En entornos altamente degradados es crucial que los mapas geológicos brinden información concerniente tanto a la parte de suelo como al lecho de roca, para usos que van desde el uso de la tierra hasta la gestión de recursos. A menudo, los geólogos se enfrentan al desafío de actualizar los mapas existentes y en áreas con situaciones que presentan dificultades (acceso, clima, seguridad) las observaciones en el terreno están escasamente disponibles, y por lo tanto, es necesario complementarlas con métodos basados en datos obtenidos por teledetección. Para este propósito, se discute el uso del método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud en la región de Midlands, Norte de Irlanda utilizando datos radiométricos aerotransportados de alta resolución adquiridos en el 2005, en grillas interpoladas de Potasio, Uranio y Torio; el análisis de estos contenidos se discute en términos de las firmas espectrales para la atribución litológica de las clases. Los mapas de clasificación supervisada resultantes se pueden considerar como modelos espaciales de la distribución del contenido de radioelementos en formaciones superficiales y subsuperficiales, la fuente de rayos gamma que emanan del suelo se relaciona principalmente con la geoquímica del lecho de roca y con las modificaciones de la distribución del radioelemento por meteorización y otros mecanismos secundarios, como la movilización por el viento o el agua. En consecuencia, los mapas de clasificación pueden integrarse dentro de un entorno SIG y ser utilizados por el geólogo como un soporte para el mapeo de las litologías de la roca madre y su alteración.

**Palabras clave:** Clasificación supervisada de máxima verosimilitud, geofísica aerotransportada, radiometría, mapeo geológico, geoquímica.

## ABSTRACT

In highly degraded environments, it is crucial that geological maps provide information concerning both the soil part and the bedrock, for uses ranging from land use to resource management. Often, geologists face the challenge of updating existing maps and in areas with situations that present difficulties (access, climate, safety), field observations are scarcely available, and therefore, it is necessary to complement them with methods based on data obtained by remote sensing. For this purpose, the use of the maximum likelihood supervised classification in the Midlands region of Northern Ireland using high resolution airborne radiometric data acquired in 2005, using interpolated grids of Potassium, Uranium and Thorium is discussed; the analysis of these contents is discussed in terms of the spectral signatures for the lithological attribution of the classes. The resulting supervised classification maps can be considered as spatial models of the distribution of the content of radioelements in surface and subsurface formations, the source of gamma rays emanating from the soil is mainly related to the geochemistry of the bedrock and to the modifications of the distribution of the radioelement by weathering and other secondary mechanisms, such as mobilization by wind or water. Consequently, the classification maps can be integrated into a GIS environment and used by the geologist as a support for the mapping of the lithologies of the parent rock and its alteration.

**Keywords:** Supervised classification of maximum likelihood, airborne geophysics, radiometry, geological mapping, geochemistry.

## INTRODUCCIÓN

Existen muchas aplicaciones de imágenes obtenidas por teledetección en aplicaciones de Ciencias de la Tierra, como el monitoreo ambiental [1], el uso de la tierra [2] y la exploración mineral [3]. Mejorar las técnicas de exploración y la identificación litológica en áreas remotas es importante para mejorar la comprensión de la geología regional. Se ha demostrado que los datos detectados remotamente son útiles para el mapeo geológico de minerales de alteración y tipos de rocas. A medida que el volumen y la variedad de los datos se vuelven cada vez más disponibles, surgen nuevos obstáculos: i) la interpretación manual no puede mantener el ritmo con la cantidad de nuevos datos entrantes y ii) la interpretación manual es generalmente subjetiva y puede ser inconsistente entre los intérpretes; especialmente con grandes conjuntos de datos.

La gamma espectrometría aerotransportada es una herramienta efectiva de mapeo geológico en una diversidad de entornos ya que la respuesta de los rayos gamma refleja la mineralogía y la geoquímica del material original y de los productos derivados por procesos de alteración. La cobertura continua que presentan los datos geofísicos aerotransportados es particularmente adecuada en áreas donde el acceso al terreno es difícil (zonas de desiertos, bosques, selvas, topografía accidentada); como resultado, las firmas radiométricas pueden contribuir a la discriminación de la roca madre y las formaciones superficiales.

En este artículo, se ilustra un enfoque propuesto en el área de Midlands, Norte de Irlanda donde el mapeo geológico existente puede correlacionarse teniendo en cuenta la interpretación de la información gamma espectrométrica aerotransportada. Esta región cuenta con un mapeo geológico convencional desarrollado por el Servicio Geológico del Norte de Irlanda [4], pero se pretende verificar el aporte del uso de datos de espectrometría de rayos gamma para complementar las observaciones realizadas en tierra.

Se ha llevado a cabo un procedimiento integrado de interpretación de datos geofísicos, basado en la extracción de clases caracterizadas por sus propiedades radiométricas homogéneas; es preciso aclarar que los datos geofísicos han sido procesados y depurados [5] y solo se utilizaron los canales finales para el análisis de clases y delimitación de unidades litogeofísicas. Esto se logró mediante un procedimiento de clasificación supervisada de máxima verosimilitud, el cual puede usarse independientemente de cualquier mapa geológico existente; este método se realizó en los datos interpolados de gamma espectrometría aerotransportada (U, K, Th, Cuentas Totales, Ternario) obteniendo un mapa de coberturas litogeofísicas el cual se compara con el mapa geológico y de acuerdo al detalle en la clasificación se analiza si corresponde a alguna zona con importancia geológica que pueda complementar o explicar el mapeo existente.

## 1. MARCO CONCEPTUAL

Las técnicas de mapeo de la geología han evolucionado progresivamente hacia la combinación de observaciones de campo y enfoques de sensores remotos. La utilización de técnicas como espectrometría de rayos gamma logra reconocer patrones coherentes de concentraciones de radioelementos con las observaciones geológicas de campo, además, la cobertura continua de estos datos geofísicos es crucial para extrapolar las observaciones puntuales del suelo a toda una región.

A medida que los *software* relacionados con Sistemas de Información Geográfica se han ido popularizando, el análisis de relaciones espaciales entre diferentes conjuntos de datos (geología, geofísica, geoquímica, etc.) han contribuido para que el mapeo geológico presente una mayor exactitud temática. Sin embargo, a medida que aumenta el número de capas de datos disponibles, este enfoque cualitativo se vuelve difícil de aplicar y requiere de la implementación de procedimientos automatizados, ejemplos de estos es la utilización de metodologías de clasificación (supervisada y no supervisada).

### 1.1 ANÁLISIS ESPACIAL MULTIVARIADO: MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

Entre los ampliamente denominados “algoritmos de clasificación”, se deben distinguir dos enfoques diferentes: las clasificaciones supervisadas y las no supervisadas. En la clasificación no supervisada o *clustering*, el *software* de procesamiento de imágenes, computa automáticamente los valores de las diferentes coberturas, agrupándolas de acuerdo a su valor espectral; mientras que en la clasificación supervisada, los valores espectrales de las diferentes coberturas son computados empleando zonas de entrenamiento, que

generalmente corresponden a sitios previamente muestreados en campo o de los que se tiene conocimiento previo del área de estudio [6].

La clasificación supervisada requiere que se disponga de un conjunto de clases definidas por el analista además de sus firmas espectrales características. Los primeros métodos que se utilizaron eran de tipo no estadístico (mínima distancia, paralelepípedos) y con ellos se obtenían resultados poco confiables, posteriormente se desarrollaron métodos basados en estadísticas (máxima verosimilitud) y algoritmos basados en inteligencia artificial (redes neuronales, arboles de decisión, clasificación contextual, lógica difusa, etc.) [7]. El enfoque que se desarrolla se realiza a través de una clasificación supervisada, ya que previamente con las imágenes interpoladas se identifican patrones de contenidos altos-medios-bajos para cada uno de los radioelementos (K, U y Th) y estos se utilizan como las zonas de entrenamiento.

## 1.2 EL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

El método de clasificación de máxima verosimilitud es una de los métodos más populares de clasificación, en este, un pixel se asigna a la clase con mayor probabilidad de acuerdo a sus características espectrales definidas por el analista.

El algoritmo de máxima verosimilitud se alimenta de puntos de control (muestreos de campo), que considera como parámetros. Posteriormente, selecciona los valores de un conjunto finito de datos (en este caso imágenes procesadas e interpoladas de gamma espectrometría) con mayor probabilidad de acercarse a algún parámetro definido previamente, para después ser agrupado en clusters, bajo un mismo valor reclasificado en temas o clases; es decir, los parámetros que maximizan la función de verosimilitud [6].

La clasificación de máxima verosimilitud también es conocida como “Clasificación por algoritmo Bayesiano”, dado que se le puede asignar probabilidades *a priori*, empleando el teorema de Bayes, el cual, expresa la probabilidad condicional de un evento aleatorio A dado en B de acuerdo a (1):

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{k=1}^n P(B|A_k)P(A_k)} \quad (1)$$

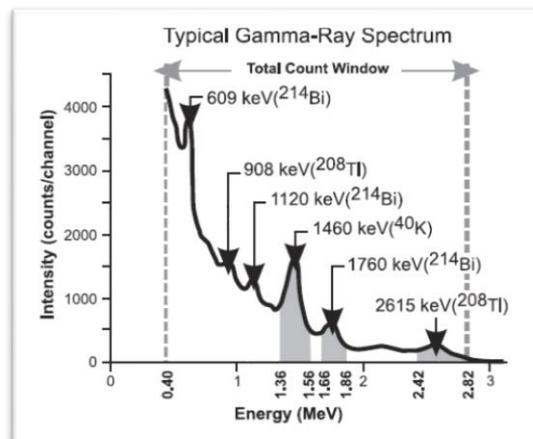
El método de máxima verosimilitud tiene una ventaja desde el punto de vista de la teoría de la probabilidad, pero se debe tener cuidado con respecto a los siguientes elementos [7]:

- a) Las muestras que se tomen como sitios de entrenamiento deber ser suficientes para de esta manera permitir la estimación del vector medio y la matriz de varianza – covarianza de la población.
- b) La matriz inversa de la matriz de varianza – covarianza se vuelve inestable en el caso donde existe una correlación muy alta entre dos bandas o los datos en terreno son muy homogéneos. Es estos casos en número de bandas debería reducirse mediante un análisis de componentes principales.

### 1.3 EL USO DE ESPECTROMETRÍA AEROTRANSPORTADA DE RAYOS GAMMA

Los rayos gamma emitidos desde la superficie de la Tierra están relacionados con la mineralogía primaria y la geoquímica de las rocas. El potasio, uranio y torio son los únicos elementos naturales con radioisótopos que producen rayos gamma de suficiente energía e intensidad para que puedan ser medidos en reconocimientos aerotransportados. Un espectro tipo de energía de radiación natural (Fig. 1) representa las tasas de conteo relativo en cada nivel de energía de 0 a 3 megaelectrón voltios (MeV). El intervalo de 0 a 0.4 MeV no se usa ya se es la denominada "Dispersión Compton" de radiación de alta energía [8].

Para efectos de mapeo geológico, son de interés los picos de  $^{40}\text{K}$  (potasio), bismuto-214 ( $^{214}\text{Bi}$ , un producto de descomposición del Uranio) y el talio-208 ( $^{208}\text{Tl}$ , un producto de descomposición del Torio). Las concentraciones de uranio y torio se determinan indirectamente a partir de sus productos hijos ( $^{214}\text{Bi}$  y  $^{208}\text{Tl}$ , respectivamente) que se asumen como en equilibrio con respecto al isotopo padre. Dado que los rayos gamma se atenúan fuertemente en rocas, suelo y aire, la mayor parte de la radiación emana de formaciones superficiales del suelo; aproximadamente el 90% de los rayos gamma medidos se reciben desde los 30 a 40 cm de suelo [9].



**Fig. 1.** Ventanas típicas de espectrometría de rayos gamma.  
**Fuente:** Ford, Harris, Shives, Carson, & Buckle, 2008 [10]

Potasio, presenta una abundancia media de 1.50% a lo largo de la corteza continental, concentrándose mayormente en la parte superior de esta. La principal ocurrencia del potasio, en asociaciones minerales, se da en feldespatos potásicos, variando entre 2.45% y 13.28%. Asimismo, el potasio también puede presentarse en micas, como la biotita y la moscovita, y en algunos aglomerados formados durante digénesis, o por alteración hidrotermal. El potasio presenta una alta movilidad, cuando la roca que lo contiene sufre desgaste, y en ambientes de alteración hidrotermal, principalmente en ambientes de clima tropical a subtropical. Siempre que se logre una calibración adecuada del sistema de registro radiométrico y que las condiciones de afloramiento sean buenas, las concentraciones de potasio en el aire son comparables a las concentraciones de roca [11].

Torio, presenta un valor promedio de 5.6 ppm a lo largo de la corteza continental, pudiendo registrar valores de hasta 10.5 ppm en la parte superior, mientras que en la parte inferior la concentraciones es de aproximadamente 1.2 ppm. Los principales minerales que contienen torio (monacita y zircón) son estables durante la meteorización y pueden acumularse en depósitos de minerales pesados. El contenido de Th es más alto en aquellas fases de roca que se forman a temperaturas muy altas [11].

Uranio, presenta un valor promedio de 3 ppm en la corteza continental, está presente en minerales de óxido y silicatos. El uranio liberado por la descomposición de minerales durante la meteorización puede retenerse en óxidos de hierro y minerales de arcilla o precipitarse en condiciones de reducción, formando depósitos de uranio en condiciones favorables. Las sustancias orgánicas, compuestos de humus en particular, tienen la propiedad de acumular uranio [11].

Debido a que los tres elementos radiactivos medidos tienen afinidades químicas específicas, su repartición en las rocas varía según parámetros como: mineralogía, condiciones oxidantes, hidrotermalismo y meteorización. Por esta razón, el U, K y Th pueden tener concentraciones muy variables en rocas que son base para el mapeo geológico.

#### **1.4 INTERPRETACIÓN DE DATOS DE GAMMA ESPECTROMETRÍA AEROTRANSPORTADA**

A diferencia de las técnicas magnéticas, electromagnéticas, gravimétricas y sísmicas convencionales que miden las propiedades físicas de la roca (a menudo en respuesta a efectos inducidos) y que pueden detectar variaciones de profundidades de fuentes de decenas a miles de metros, las técnicas de espectrometría miden las variaciones en la radiactividad que emana hasta profundidades máximas de 50 cm de la superficie de la Tierra. Los tres elementos radiactivos naturales más abundantes, el Potasio, el Uranio y el Torio, se presentan como elementos principales, móviles e inmóviles, respectivamente, en proporciones variables en todos los tipos de rocas y suelos.

Debido a que la concentración de cada elemento radiactivo varía entre diferentes tipos de rocas, se puede usar un espectrómetro de rayos gamma para medir estas variaciones y mapear efectivamente los diferentes tipos de rocas. Cuando la firma (*signature*) radiactiva normal se ve alterada por un proceso de mineralización, la forma resultante relacionada con la alteración proporciona una orientación en la exploración. La interpretación se vuelve complicada cuando estas firmas relacionadas con el lecho rocoso se enmascaran por recubrimientos de material superficial transportado o por efectos extremos de meteorización.

La interpretación de los datos de espectrometría requiere la comprensión de algunos conceptos básicos de la espectrometría de rayos gamma y la importancia de controles adecuados en la calibración del sistema, la adquisición de datos, el procesamiento de datos y los métodos de presentación, algunos conceptos básicos se enumeran aquí [10]:

- La gamma espectrometría aerotransportada es una técnica geofísica detectada remotamente que proporciona información sobre la distribución de K, U y Th que es directamente interpretable en términos de geología de superficie.
- La gamma espectrometría aerotransportada es solo una técnica de superficie; la interpretación requiere una comprensión de la naturaleza de los materiales superficiales y su relación con la geología del lecho de roca.
- A diferencia de un lente de una cámara, un espectrómetro de rayos gamma no tiene un “campo de visión fijo”: se puede detectar una fuente puntual altamente radiactiva incluso cuando se encuentra fuera de algún campo de visión nominal.
- El flujo de rayos gamma disminuye exponencialmente con la distancia de la fuente.

La utilidad de la gamma espectrometría aerotransportada en el mapeo geológico y la exploración mineral depende de dos factores: i) La medida en que la distribución del radioelemento se relaciona con las diferencias del lecho de roca y como esta distribución puede ser modificada en procesos de mineralización y ii) La medida en que el contenido del radioelemento en el lecho de roca se refleja en los materiales superficiales que pueden estar relacionados espacialmente con las fuentes de roca madre [10]. Por lo tanto, la aplicación efectiva de la gamma espectrometría aerotransportada al mapeo geológico y la exploración mineral debe basarse en el conocimiento de: i) como las distribuciones de elementos radiactivos adquiridos se correlacionan con las firmas litológicas normales, ii) como estas firmas litológicas normales son modificadas por procesos de mineralización (firmas de alteración), iii) como estas firmas litológicas y de alteración se incorporan en los materiales superficiales y iv) como estos materiales superficiales pueden estar espacialmente relacionados con las fuentes de roca madre. Las aplicaciones y los métodos de mapeo deben estar dirigidos a abordar estos cuatro problemas básicos de interpretación efectiva de datos de radiometría.

## **1.5 VISUALIZACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

### **1.5.1 Variables y productos estándar de un levantamiento gamma espectrométrico.**

Los datos de espectrometría de rayos gamma aerotransportados suelen estar representados por cuatro variables medidas: potasio (K, %), Uranio equivalente (eU, ppm), Torio equivalente (eTh, ppm) y la tasa de dosis total (nGy/hora). Se requieren cuatro productos derivados para presentar completamente los datos de gamma espectrometría aerotransportada, estos incluyen las tres razones de elementos radiactivos (eU/eTh, eU/K y eTh/K) además del mapa ternario de los elementos radiactivos.

El mapa de elementos radiactivos ternarios o de tres componentes es un método eficaz para mostrar las variaciones y las abundancias relativas de los tres elementos radiactivos. Las áreas de la imagen con el mismo color tendrán proporciones similares de K, eU, eTh y la intensidad de ese color es una medida de la radiactividad total. Esto permite que el mapa represente la distribución de

elementos radiactivos mejor que cualquiera de los otros mapas de variables o relaciones individuales.

A menudo, dependiendo de la complejidad de la geología, variaciones sutiles de K, U y/o Th pueden ser no evidentes. Por estas razones, la interpretación adecuada de los datos requiere el examen de todas las variables medidas y de los productos derivados asociados.

### **1.5.2 Visualización de los datos.**

#### **a) Multibanda**

Al igual que una imagen LANDSAT o imágenes de radar, los canales de rayos gamma (bandas) pueden mostrarse como imágenes compuestas de color ternario, permitiendo la interpretación de tres canales de datos elementales o de relación utilizando una mezcla aditiva de colores primarios (rojo-verde-azul).

#### **b) Mejora**

Al igual que cualquier conjunto de datos ráster, a las imágenes gamma espectrométricas se les puede aplicar mejoras bien sea en contraste o color para mejorar su rango dinámico usando la mayoría de los sistemas de análisis de imágenes. Estas mejoras son más que simples transformaciones aritméticas para transformar datos. Implican una transformación estadística multivariada de los datos (contraste) o una transformación de espacio de color (saturación). En ambos casos, el objetivo es el mismo: proporcionar una imagen en la que se mejoren las características geológicas sutiles a través de una amplia gama de matices.

#### **c) Fusión**

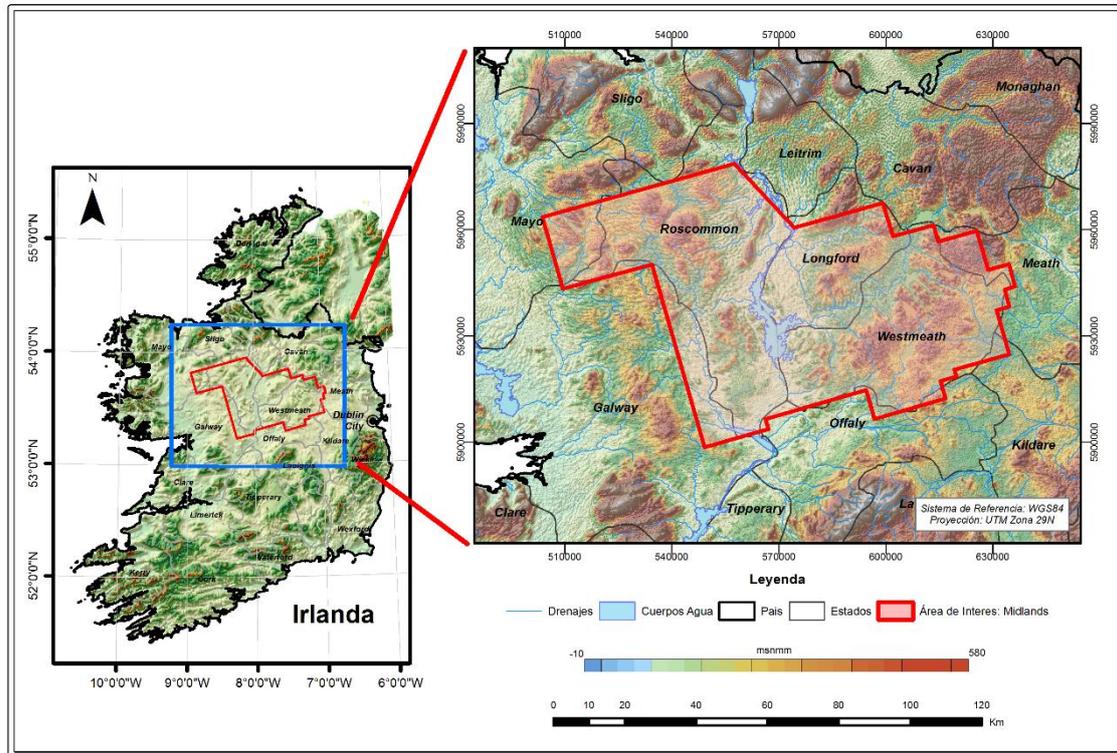
Al igual que en los datos ópticos, los datos de rayos gamma pueden fusionarse con otros tipos de información detectada remotamente para crear imágenes complementarias a partir de los conjuntos de datos combinados. Por ejemplo, una fusión de rayos gamma y datos magnéticos proporciona a menudo una imagen en la que se pueden identificar muchas características geológicas, incluidos los dóminos de radioelementos, fallas, lineamientos, etc. Los datos de rayos gamma también se pueden fusionar con datos topográficos en una imagen en la que las posibles anomalías de radioelementos se pueden comparar directamente con los patrones topográficos; esto se aplica para ayudar a determinar la fuente de anomalías.

## **2. CASO DE ESTUDIO: MIDLANDS, NORTE DE IRLANDA**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDIO**

El levantamiento de datos geofísicos en el Norte de Irlanda, específicamente en la región de Midlands se realizó por la empresa CGG Airbone Ltd [12], entre septiembre de 2014 y junio de 2015. La prospección se realizó principalmente en los condados de Longford, Westmeath y Roscommon (Fig. 2) en un área que es predominantemente agrícola. Las áreas de tierras altas se encuentran sobre las montañas Wicklow en el sureste, la extensión norte de las montañas Slieve Bloom al sur del área y, en menor medida, en las partes del norte de Roscommon. La ciudad de Dublín se encuentra al este del área y ha sido

excluida del levantamiento debido a restricciones de vuelo [5]. El contratista CGG Airbone Survey Ltd utilizó dos aeronaves de ala fija (Cessna 208B) para todo el trabajo del levantamiento de datos, la velocidad nominal para ambas aeronaves fue de 53 m/s, mientras que la altura de prospección fue de 90 m en zonas rurales y de 240 m en áreas urbanas. Las especificaciones del levantamiento aerotransportado se resumen en la Tabla 2.



**Fig. 2.** Zona del levantamiento geofísico aerotransportado. Midlands, Norte de Irlanda  
**Fuente:** Elaboración Propia, 2017

**Tabla 1.** Especificaciones del levantamiento aerogeofísico, Midlands, Norte de Irlanda

Espaciamiento Líneas de Vuelo	200 m
Espaciamiento Líneas de Control	2000 m
Dirección de las Líneas de Vuelo	165/345°
Dirección de la Líneas de Control	75/255°
Altura Nominal de Vuelo	90 m a 240 m (Seguridad Vuelo)
Proyección / Datum	UTM Zona 29N, WGS84

**Fuente:** Hodgson y Ture, 2016 [5]

## 2.2 MARCO GEOLÓGICO

El área del levantamiento está dominada por rocas carboníferas que se extienden a través de la mayoría de la zona de estudio. Las rocas calizas y las lutitas de la formación *Visean* además de las calizas basales son las más prominentes, también forman parte significativa del ambiente geológico las rocas calizas de las formaciones *Waulsortian* y *Courceyan*. Al noroeste de área de prospección en la parte norte de condado de Dublín y en el condado de Meath se encuentran pizarras de la formación *Rathkenny* y del Grupo *Navan*. Las areniscas del devónico están presentes en el suroeste del área topográfica del condado de Laois, formando las montañas *Slieve Bloom*. Al sureste, las unidades

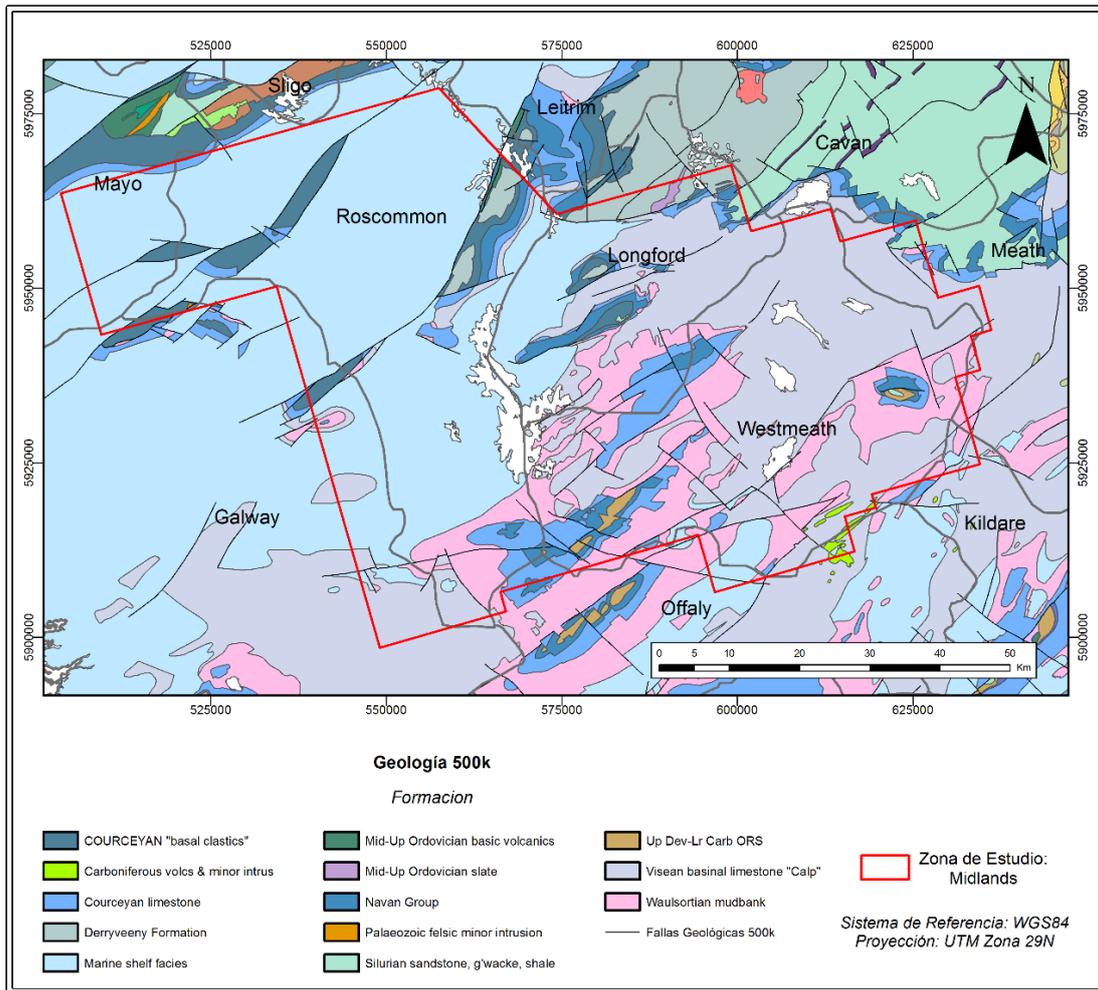
graníticas del Norte de Linster dominan el área, formando las tierras altas del condado de Wicklow; los sedimentos y meta-sedimentos encierran el granito al este y oeste, a través de las montañas *Maulin* y *Butter*. Las rocas más antiguas del área son las areniscas y cuarcitas del cámbrico que se encuentran en el condado de Wicklow y partes de Dublín como el Grupo *Bray Head* [5]. Las principales unidades geológicas están mapeadas a escala 1:500.000 (Fig. 3).

El área ha sido sometida a varios episodios de glaciación que se refleja en la distribución de los subsuelos y los sedimentos en el área. Los depósitos glaciares se extienden a lo largo de la mayor parte del área derivándose en rocas calizas hasta hacer de estas predominantes en la zona de interés. Las zonas relacionadas con agricultura que son derivadas de las areniscas del Carbonífero y del Devónico, y de las areniscas y pizarras del Paleozoico Inferior también son prominentes y están estrechamente asociadas con el lecho rocoso subyacente. Extensos depósitos de turba se encuentran en toda la zona, pero predominantemente a través de las tierras bajas de la región central, así como de los depósitos de turba en la parte más alta de la Montaña *Wicklow*. Los sedimentos aluviales a lo largo de cursos fluviales y algunos depósitos de grava significativos también están presentes. Los depósitos de arena y grava de *Curragh* en el condado de Kildare forman un importante acuífero de grava de importancia regional, además existen otros depósitos de arena y grava en zonas más pequeñas, con numerosos pozos en funcionamiento, particularmente a lo largo del condado de Kildare-Wicklow [4] [5] [12] [13].

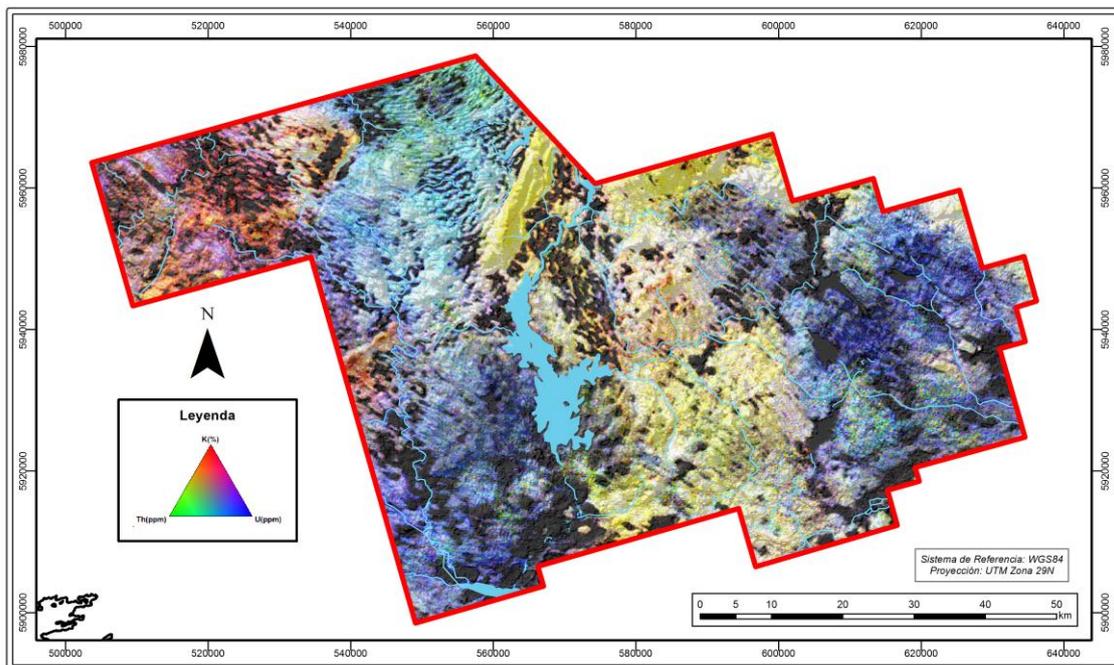
### **2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS GEOFÍSICOS DE GAMMA ESPECTROMETRÍA.**

Los datos radiométricos en toda la región muestran el efecto combinado de la radiación natural producida a partir del suelo y la geología subyacente. La Fig. 4 muestra un diagrama ternario del área de interés que asigna un color a cada uno de los tres elementos (Uranio – azul, potasio – rojo y torio – verde). Los valores intermedios de los elementos están representados por unas combinaciones de estos colores. Los colores blancos muestran áreas que son altas en los tres elementos mientras que los colores marrones oscuros / negros muestran áreas que tienen recuentos radiométricos bajos, generalmente como consecuencia de masas de agua o de suelo saturado.

Se observan concentraciones más altas de uranio en gran parte de la región, lo que refleja la amplia distribución de las rocas calizas del carbonífero y de los esquistos en la región. En particular, las concentraciones de uranio más altas (indicadas por los colores azules en la Fig. 4) son prominentes, tanto en el condado de Roscommon como en el este de Westmeath, y generalmente se asocian con rocas calizas [5].



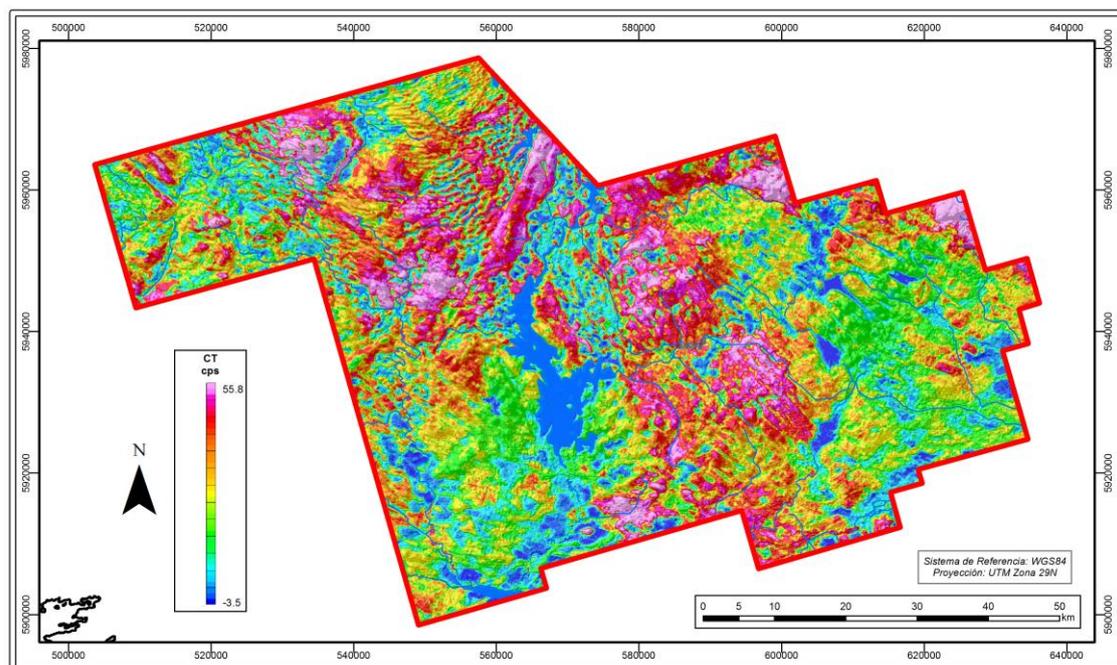
**Fig. 3.** Mapa geológico de Formaciones Rocosas. Escala 1:500.000  
**Fuente:** Elaboración Propia a partir de Geological Survey of Ireland, 2006 [4]



**Fig. 4.** Imagen Radiométrica Ternaria (Azul – Uranio, Rojo – Potasio, Verde – Torio)  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de CGG Airbone Ltd, 2015 [12]

Los valores más altos de potasio se encuentran en el noroeste de Roscommon, donde la arenisca cubre los afloramientos de las calizas. Otros puntos altos de potasio también son prominentes en el norte de Wicklow sobre el gran granito que identifica esta área. Varias áreas muestran fuertes formas amarillas que indican concentraciones de potasio y torio proporcionales con bajos niveles de uranio. Estos está asociado con las areniscas del Silúrico y los esquistos del grupo Bray head en el condado de Wicklow. Las areniscas y conglomerados asociados presentes en los condados de Longford y Roscommon también muestran niveles elevados de potasio y torio, con más colores anaranjados que sugieren un mayor contenido de potasio, los valores más altos de torio en relación con los niveles de uranio y de potasio están mapeados por los colores verde (Fig. 5) localizándose en el centro de la región en el condado de Offaly [4] [5] [12].

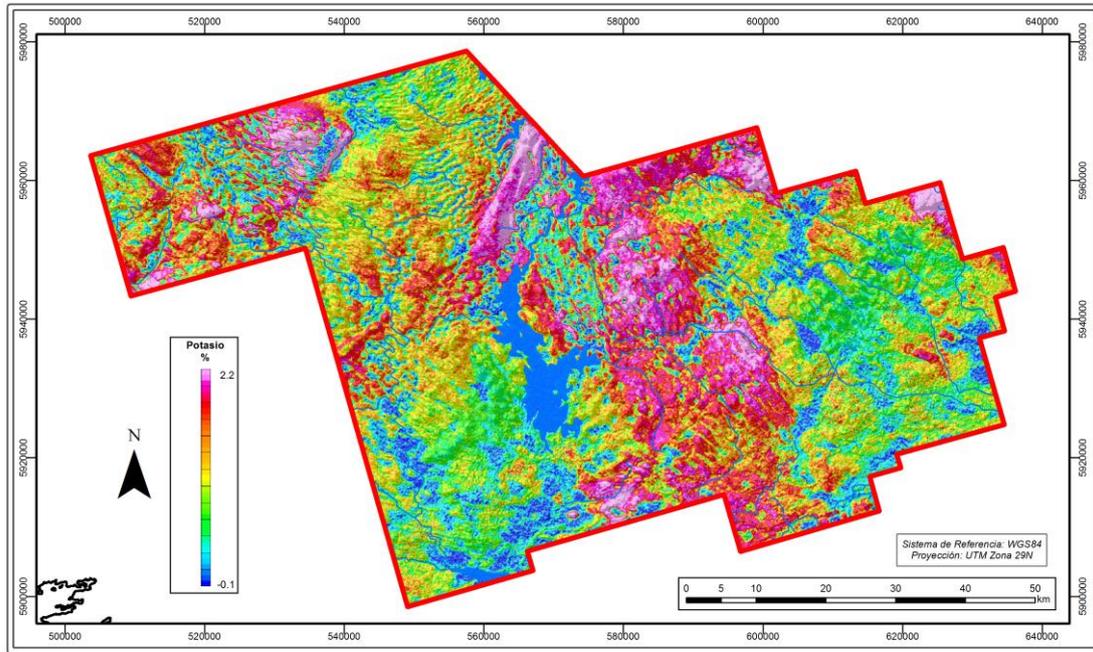
Las respuestas en negro y marrón oscuro del mapa ternario muestran la extensión de los cuerpos de agua y los depósitos de turba en la región. En estas áreas, la señal radiométrica se ha atenuado parcial o totalmente.



**Fig. 5.** Cuentas Totales (cps) en la región de Midlands, Norte de Irlanda  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de CGG Airbone Ltd, 2015 [12]

### 2.3.1 Potasio

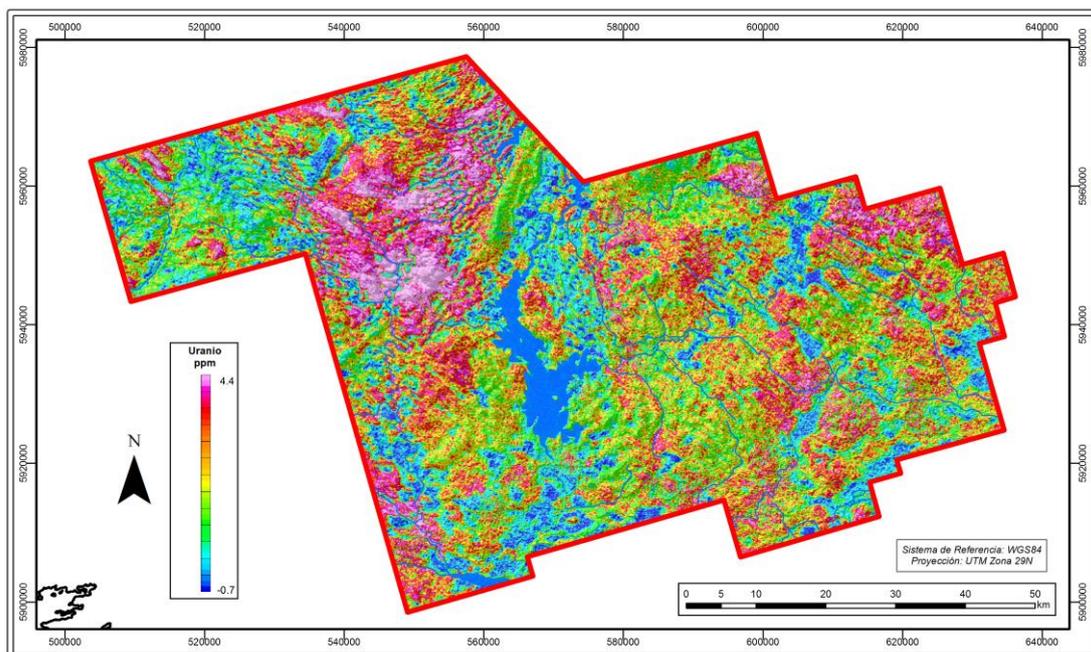
Los valores de potasio van desde un poco más del 0% hasta el 2.5% en toda la región. Los valores más altos se encuentran predominantemente en el este de la región sobre los sedimentos en el condado de Meath y el granito en el norte de Wicklow. Niveles elevados también se encuentran sobre las areniscas del condado de Roscommon [5]. En la Fig. 6 se muestra un mapa de potasio para la región.



**Fig. 6.** Potasio (K - %) en la región de Midlands, Norte de Irlanda  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de CGG Airbone Ltd, 2015 [12]

### 2.3.2 Uranio

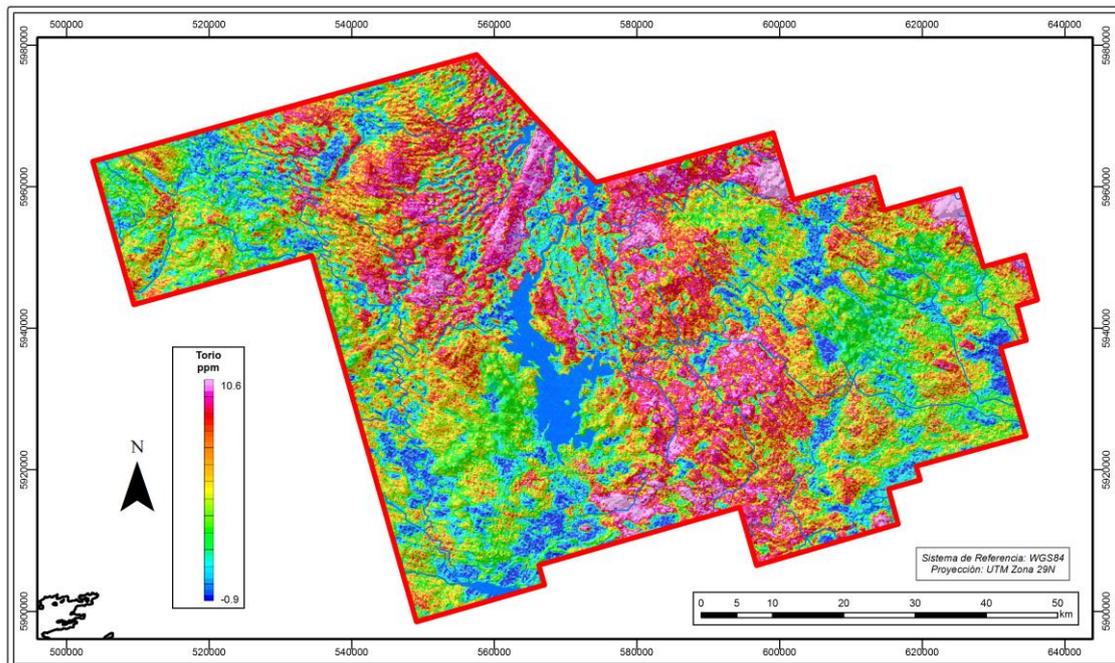
Los valores de uranio van desde valores nulos de concentración hasta cerca de 4 ppm en concentración relativa para toda la región. Los valores más altos se registraron en una cantera de esquistos en el condado de Meath [5]. Las firmas espectrales del uranio marcan claramente la extensión de los *shales* dentro de la Formación Donore y sirven para la delimitación de la extensión de la cantera. En la Fig. 7 se muestra un mapa de uranio para la región.



**Fig. 7.** Uranio (U – ppm) en la región de Midlands, Norte de Irlanda  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de CGG Airbone Ltd, 2015 [12]

### 2.3.3 Torio

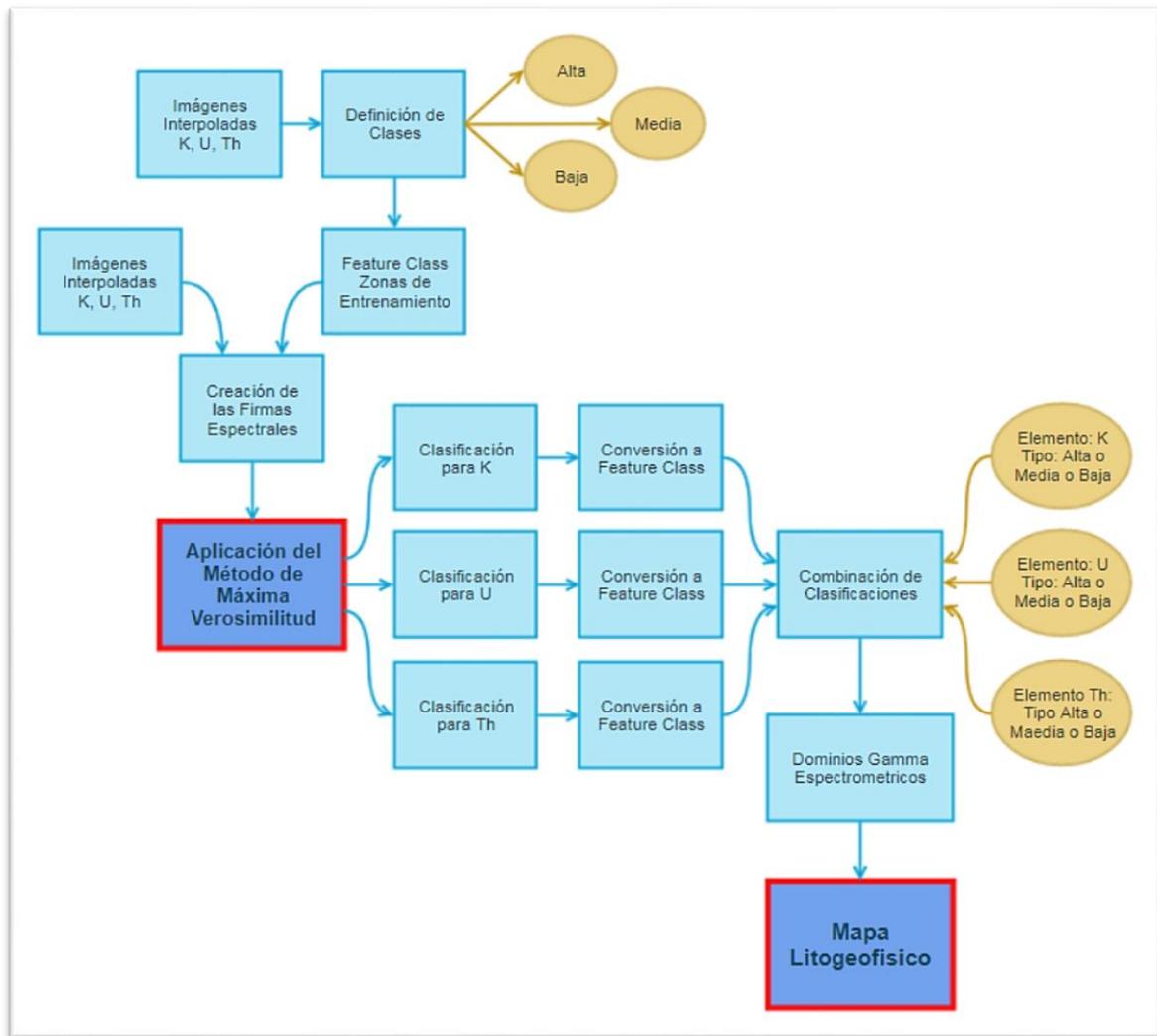
Los valores de torio van desde valores nulos de concentración hasta cerca de 11 ppm en concentración relativa para toda la región. Las concentraciones más altas de torio en comparación con los otros elementos son evidentes en el centro de la región en los condados de Kildare, Offaly y Westmeth; aquí, una firma verde en la imagen ternaria indica concentraciones moderadas de torio y bajos niveles de potasio y uranio [5]. En la Fig. 8 se muestra un mapa de torio para la región.



**Fig. 8.** Torio (Th – ppm) en la región de Midlands, Norte de Irlanda  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de CGG Airbone Ltd, 2015 [12]

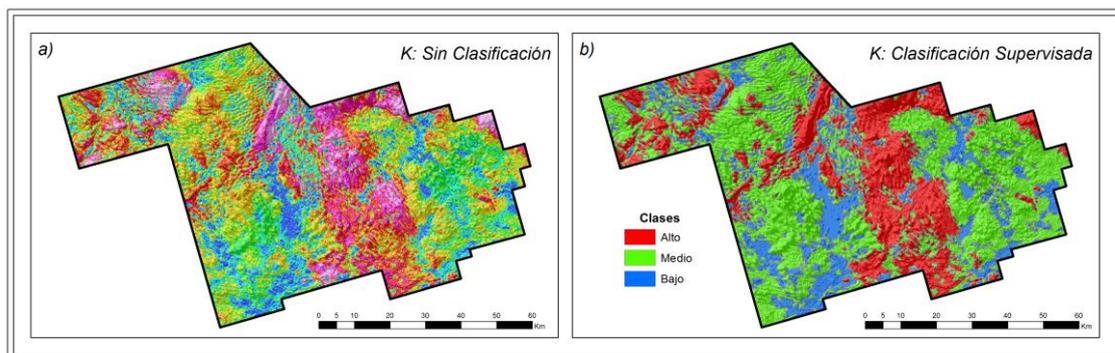
## 2.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

Los pasos involucrados en el procesamiento y análisis de los datos para producir las unidades litogeofísicas se muestra en la Fig. 9. El software de procesamiento utilizado consistió en ArcGis 10.4 equipado con la herramienta de análisis espacial. Las imágenes interpoladas por mínima curvatura [14] para cada uno de los elementos (K, U y Th) se analizan y se definen tres clases principales: concentraciones Altas, concentraciones Medias y concentraciones Bajas, definidas las clases se establecen para cada una de las imágenes las zonas de entrenamiento, procurando que cada imagen quede con suficiente muestreo para que las firmas espectrales se definan claramente; posteriormente se realiza, a través de la herramienta de análisis espacial / Clasificación de Máxima Verosimilitud, la clasificación teniendo en cuenta las varianzas y covarianzas de las firmas espectrales de cada una de las clases especificadas, de esta manera a cada celda de la imagen (K, U, Th) se le determina la probabilidad estadística y así se define a cual clase pertenece. Las Fig. 10, 11 y 12 muestran para cada uno de los elementos la clasificación obtenida.



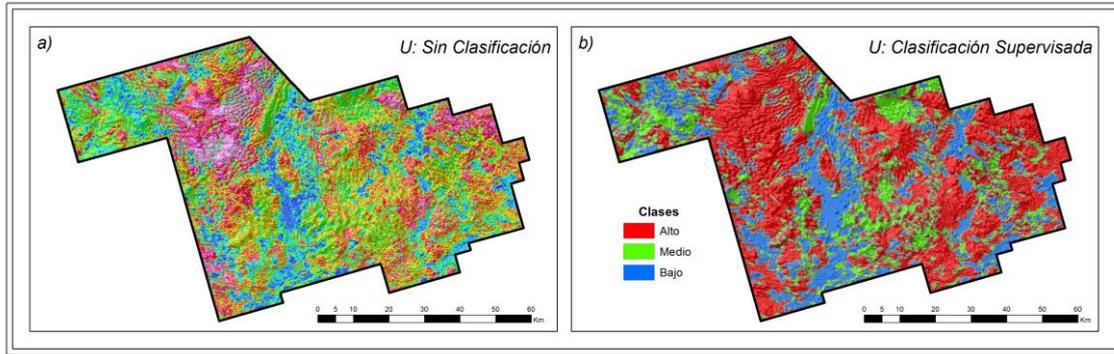
**Fig. 9.** Pasos para el procesamiento y análisis de los datos para la obtención de unidades litogeofísicas. Midlands, Norte de Irlanda.

**Fuente:** Elaboración propia, 2017

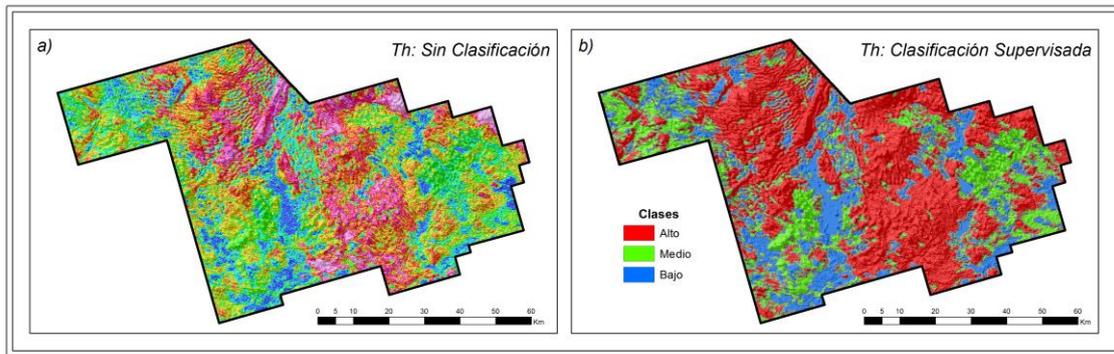


**Fig. 10.** Clasificación Supervisada de máxima verosimilitud para potasio (K). a) Imagen interpolada, b) Imagen Clasificada.

**Fuente:** Elaboración propia, 2017.



**Fig. 11.** Clasificación Supervisada de máxima verosimilitud para uranio (U). a) Imagen interpolada, b) Imagen Clasificada.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2017.



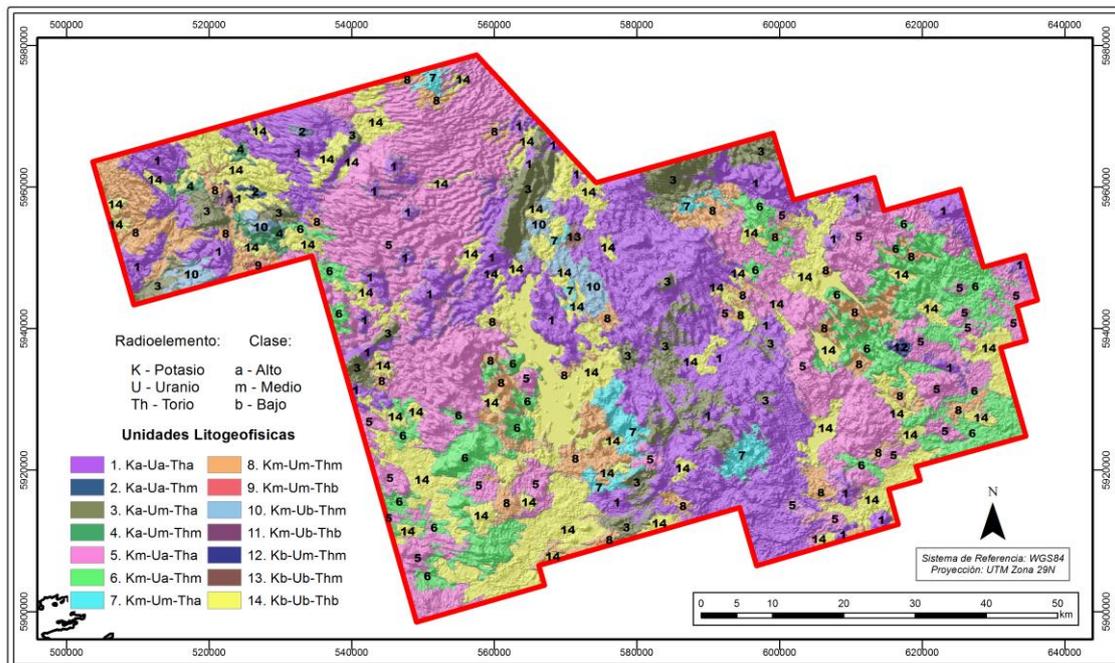
**Fig. 12.** Clasificación Supervisada de máxima verosimilitud para torio (Th). a) Imagen interpolada, b) Imagen Clasificada.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2017.

Una vez se tiene la clasificación de cada imagen, se definen los dominios gamma espectrométricos que van a conformar el mapa de unidades litogeofísicas, dado que son tres elementos (K, U y Th) y cada elemento se le asignaron tres clases (Alto, Medio, Bajo) se pueden establecer hasta veintisiete (27) combinaciones únicas posibles; de esta manera se procedió a realizar cada una de las combinaciones obteniéndose únicamente catorce (14) combinaciones o dominios gamma espectrométricos de relevancia para la región (Tabla 2), con eso se conforma el mapa final de unidades litogeofísicas para el área de Midlands en el Norte de Irlanda (Fig. 13, 14 y 15).

**Tabla 2.** Descripción de las Unidades Litogeofísicas para la región de Midlands, Norte de Irlanda.

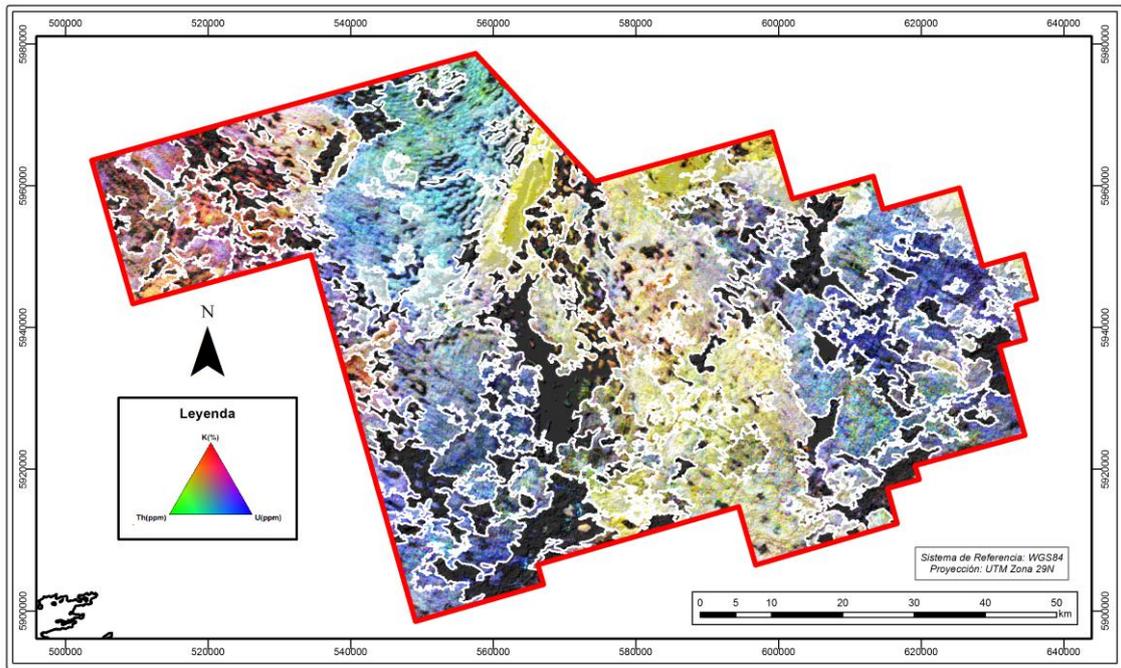
No. Dominio	Dominio	Detalle	Prioridad
1	Ka-Ua-Tha	Valores altos para Potasio, Uranio y Torio	Alta
2	Ka-Ua-Thm	Valores altos para potasio y uranio	Alta
3	Ka-Um-Tha	Valores altos para Potasio y Torio	Alta
4	Ka-Um-Thm	Valores altos para potasio	Alta
5	Km-Ua-Tha	Valores altos para Uranio y Torio	Alta
6	Km-Ua-Thm	Valores altos para Uranio	Alta
7	Km-Um-Tha	Valores altos para Torio	Media
8	Km-Um-Thm	Valores medios para los tres elementos	Media
9	Km-Um-Thb	Valores medios para uranio y potasio	Media
10	Km-Ub-Thm	Valores medios para potasio y torio	Media
11	Km-Ub-Thb	Valores medios para potasio	Media
12	Kb-Um-Thm	Valores medios para uranio y torio	Media
13	Kb-Ub-Thm	Valores bajos para uranio y potasio	Baja
14	Kb-Ub-Thb	Valores bajos para los tres elementos	Baja

Fuente: Elaboración propia, 2017.

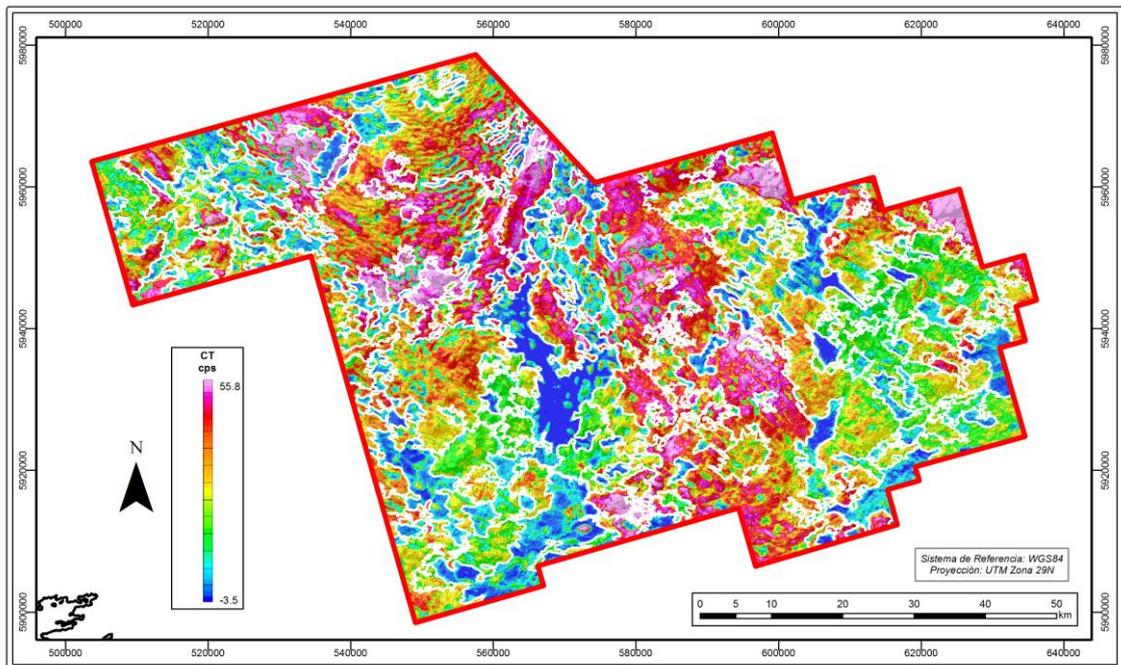


**Fig. 13.** Mapa de Unidades Litogeofísicas en la zona de Midlands, Norte de Irlanda.

Fuente: Elaboración propia, 2017



**Fig. 14.** Mapa de Unidades Litogeofísicas en la zona de Midlands, Norte de Irlanda, que superponen a la Imagen Ternaria RGB.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2017



**Fig. 15.** Mapa de Unidades Litogeofísicas en la zona de Midlands, Norte de Irlanda, que superponen a la Imagen de Cuentas Totales.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2017

### **3. CONCLUSIONES**

La capacidad de la espectrometría de rayos gamma para mapear la distribución de potasio, uranio y torio en la superficie de la Tierra proporciona una poderosa ayuda para el mapeo geológico regional y local de una región. También brinda orientación importante de exploración directa e indirecta en una amplia variedad de entornos geológicos, así como también información importante para el monitoreo de la radiación ambiental y planificación del uso de la tierra.

La clasificación supervisada de máxima verosimilitud propuesta permite clasificar datos radiométricos en grupos que tienen comportamientos espectrales cercanos. Este método permite agrupar individuos en función de su semejanza según las mediciones de rayos gamma aerotransportados de Potasio, Uranio y Torio. El resultado es un mapa geológico predictivo que comprende información de la geología sólida y de suelo. Con el fin de separar la geología sólida con los materiales de suelo, el intérprete necesita algunos conocimientos geológicos, así como la comprensión de los procesos de meteorización. Se muestra que tales mapas predictivos, se pueden usar como soporte para la actualización de mapas geológicos, por ejemplo en zonas cubiertas por bosques o en zonas donde el acceso es limitado, lento y en algunas ocasiones peligroso.

El análisis multivariable de la radiometría de rayos gamma aerotransportada permite una clasificación objetiva de las unidades geológicas que presentan firmas espectrales de Potasio, Uranio y Torio comparables. Además, el procedimiento de clasificación de máxima verosimilitud permite el análisis de las relaciones jerárquicas de las clases que reflejan los procesos geológicos. El método también proporciona el contenido promedio de Potasio, Uranio y Torio de las clases, lo que da una idea de la geoquímica de las rocas, así como de las propiedades de los suelos.

La interpretación adecuada de los datos de espectrometría de rayos gamma requiere una comprensión clara de la petrología, la geología superficial y de la roca madre, la geoquímica, así como el método de espectrometría de rayos gamma en sí. A pesar de la disponibilidad de grandes cantidades de datos espectrométricos de rayos gamma recopilados desde la década de 1970 y el desarrollo y publicación de numerosos casos que demuestran claramente la aplicación al mapeo y la exploración mineral, la técnica sigue siendo poco utilizada y poco comprendida por muchos usuarios potenciales. El reto sigue siendo el desarrollo de técnicas e que ilustren la amplia gama de aplicaciones.

## REFERENCIAS

- [1] C. Munyati, "Wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia, by classification of a multitemporal remote sensing image dataset," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, nº 9, pp. 1787-1806, 2000.
- [2] F. Yuan, K. Sawaya, B. Loeffelholz y M. Bauer, "Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing," *Remote Sensing of Environment*, vol. 98, pp. 317-328, 2005.
- [3] R. Shives, B. Charbonneau y K. Ford, "The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry—Recognition of alteration related to mineralization," *Geophysics*, vol. 65, nº 6, pp. 2001-2011, 2000.
- [4] Geological Survey of Ireland, GSI Bedrock Geology 500K Series, 2006.
- [5] J. A. Hodgson y M. D. Ture, "Interpretation of the Tellus A1 & North Midlands Airbone Geophysical Surveys," Geological Survey of Ireland, Dublin, 2016.
- [6] R. J. Vázquez de La Torre, *Metodología para ajustar clasificaciones supervisadas de imágenes satelitales, una contribución a la conservación del gorrión serrano (Xenospiza baileyi)*, México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [7] Japan Association of Remote Sensing, Remote Sensing Note, Tokyo: Japan Association of Remote Sensing, 1993.
- [8] International Atomic Energy Agency, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, Vienna, Austria: IAEA, 2003.
- [9] B. Minty, "Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry," *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, vol. 17, nº 2, pp. 39-50, 1997.
- [10] K. Ford, J. R. Harris, R. Shives, J. Carson y J. Buckle, "Remote predictive mapping 2. Gamma-ray spectrometry: A tool for mapping Canada's North," *Geoscience Canada*, pp. 109-126, 2008.
- [11] L. M. Carvalho Mendes, *Integração de dados de geofísica aérea aplicada a geologia e à prospecção mineral no Distrito Esmeraldífero de Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG*, Brasília: Universidade de Brasília, 2006.
- [12] CGG Airbone Ltd, "GENESIS Airborne Electromagnetic, Magnetic and Radiometric Geophysical Survey," CGG Airbone Ltd, 2015.
- [13] Society of Economic Geologists Student Chapter, "Ore Deposits and Mining in Ireland. A field trip guidebook for Pb-Zn, Au, Cu and halite mineralization in Ireland," Society of Economic Geologists Student Chapter, Zürich, 2016.
- [14] C.-s. Yang, S.-p. Kao y P.-s. Hung, "Twelve different interpolation methods: A case study of Surfer 8.0," *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, pp. 778-785, 2004.